



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 41 22 925 A 1**

⑤1 Int. Cl. 5:
G 01 N 21/25
G 01 N 21/03
G 01 J 3/12
G 02 B 6/12
G 02 F 1/125

②1 Aktenzeichen: P 41 22 925.8
②2 Anmeldetag: 11. 7. 91
④3 Offenlegungstag: 21. 1. 93

DE 41 22 925 A 1

⑦1 Anmelder:
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eV, 8000 München, DE

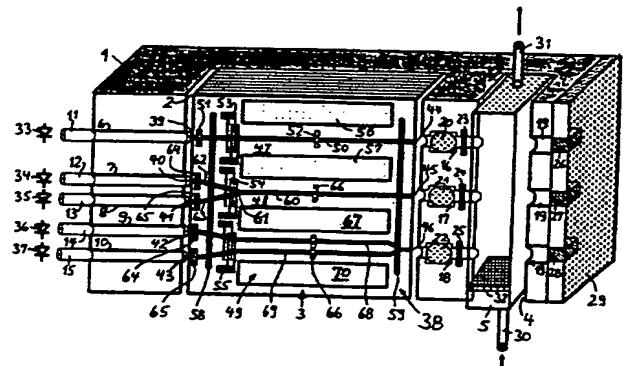
⑦4 Vertreter:
Rackette, K., Dipl.-Phys. Dr.-Ing., Pat.-Anw., 7800
Freiburg

⑦2 Erfinder:
Hinkov, Vladimir, Dr., 7815 Kirchzarten, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Optisches Spektrometer

⑤7 Ein optisches Spektrometer verfügt über mehrere licht-
emittierende Dioden (33-37) als Beleuchtungseinrichtung für
eine durchstrahlte Mikroküvette (5). Das vom Stoff in der
Mikroküvette (5) durchgelassene Licht wird mit Hilfe einer
Diodenanordnung (29) erfaßt. Die Monochromatoreinrich-
tung des Spektrometers besteht aus mehreren integriert-op-
tischen akustisch-steuerbaren Wellenlängenfiltern (47-49),
die elektronisch durchstimmbare sind.



BEST AVAILABLE COPY

DE 41 22 925 A 1

Die Erfindung betrifft ein optisches Spektrometer mit einer an wenigstens einen Lichtwellenleiter angekoppelten Beleuchtungseinrichtung zur Anstrahlung eines in einem Meßprobenraum enthaltenen spektroskopisch zu untersuchenden Stoffes, mit einer Monochromatoreinrichtung und mit einer Detektoranordnung.

Ein derartiges Spektrometer ist beispielsweise aus der DE-PS 34 03 372 der Anmelderin bekannt und verfügt über eine als dispergierendes Element ein Prisma enthaltende Monochromatoreinrichtung. Bei üblichen Spektrometern und insbesondere dem aus der genannten Patentschrift bekannten Spektrometer ist ein Wechsel der Wellenlänge mit mechanischen Veränderungen oder Justierungen verbunden. Diese nehmen eine verhältnismäßig lange Zeit in Anspruch, so daß die bekannten Spektrometer einen schnellen Wellenlängenwechsel nicht erlauben. Ein weiterer Nachteil der bekannten Spektrometer besteht darin; daß diese einen großen Platzbedarf haben und sich somit nicht für Miniatur-Analysegeräte eignen.

Im Journal of Lightwave Technology, Volume 6, No. 6, June 1988, Seite 903 bis 908 ist unter dem Titel "Collinear Acoustooptical TM-TE Mode Conversion in Proton Exchanged Ti : LiNbO₃ Waveguide Structures" ein Effekt beschrieben, der es gestattet, elektronisch durchstimmbare Filter aufzubauen. In Electronics Letters, 9th November 1989, Vol. 25, No. 23, Seiten 1583 bis 1584 ist unter dem Titel "Integrated Optical, Acoustically Tunable Wavelength Filter" ein elektronisch schnell durchstimmbares Wellenlängenfilter beschrieben. Eine Verwendung eines solchen Filters in einem Spektrometer scheitert zunächst daran, daß die durchstimmbare Bandbreite von nur etwa 100 Nanometer zu klein ist.

Ausgehend von dem oben genannten Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein optisches Spektrometer zu schaffen, das sich besonders klein aufbauen läßt und einen schnellen Wechsel von Wellenlängen zuläßt.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Monochromatoreinrichtung durch wenigstens ein integriert-optisches akustisch-steuerbares Wellenlängenfilter gebildet ist, dessen Ausgangslicht nach einer Wechselwirkung mit dem zu untersuchenden Stoff die Detektoranordnung beaufschlagt.

Dadurch, daß die Monochromatoreinrichtung nicht mehr als Gitter oder als Prisma ausgebildet ist, kann ein Wellenlängenwechsel schnell und einfach durch Verändern der Steuerfrequenz des verwendeten Wellenlängenfilters erfolgen.

Weitere Ausgestaltungen und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Spektrometers,

Fig. 2 einen mikrooptischen Chip für ein erfindungsgemäßes Spektrometer, bei dem der zu untersuchende Stoff über optische Fasern mit Licht beaufschlagt wird,

Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel eines besonders kurzen mikrooptischen Chips für ein Spektrometer gemäß der Erfindung,

Fig. 4 einen Teil eines Spektrometers gemäß der Erfindung für eine Messung sowohl in Transmission als auch in Reflexion und

Fig. 5 einen Teil eines Spektrometers gemäß der Erfindung mit einer schräg zum Strahlengang angeordneten Mikroküvette und einer Detektoranordnung zur Bildung von Referenzsignalen.

In Fig. 1 erkennt man in perspektivischer Ansicht eine schematisierte Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels für ein elektronisch steuerbares miniaturisiertes optisches Spektrometer für den sichtbaren und nahen Infrarotbereich. Das Spektrometer verfügt über ein Siliziumsubstrat 1 mit einer Länge von beispielsweise 10 bis 12 Zentimetern, einer Breite von 1 bis 2 Zentimetern und einer Dicke von 0,5 Zentimetern. Das Siliziumsubstrat 1 ist anisotrop geätzt und verfügt über eine erste Ausnehmung 2 zur Aufnahme eines XY-LiNbO₃-Substrates 3 (X-Schnitt, Y-Ausbreitung der Wellen) sowie über eine zweite Ausnehmung 4 zur Aufnahme einer optischen Mikroküvette 5.

Wie man auf der linken Seite in Fig. 1 erkennt, sind im Siliziumsubstrat 1 weiterhin mehrere parallelverlaufende V-Gruben 6, 7, 8, 9 und 10 zur Aufnahme von monomodigen optischen Eingangsfasern 11, 12, 13, 14 und 15 vorgesehen. Weiterhin verfügt das Siliziumsubstrat 1 über fluchtend und gegenüberliegend zu den V-Gruben 6, 7, 8, 9 und 10 angeordnete Hohlräume 16, 17, 18 sowie Lichtkanäle 19. Die Hohlräume 16, 17 und 18 enthalten jeweils eine Mikrolinse 20, 21 und 22 mit einem Durchmesser von etwa 0,3 Millimetern und TM-Moden absorbierende Polarisatoren 23, 24, und 25.

Das durch die Polarisatoren 23, 24 und 25 gelangende Licht durchquert die Mikroküvette 5, die beispielsweise 1 Millimeter dick und 10 Millimeter lang ist, bevor es über die Lichtkanäle 19 zu optischen Detektoren 26, 27 und 28 einer Detektoranordnung 29 gelangt. Die optischen Detektoren 26, 27 und 28 sind an eine in der Zeichnung nicht dargestellte Auswertelektronik angeschlossen. Die Detektoranordnung kann wie in Fig. 1 dargestellt auf einem gesonderten Teil ausgebildet oder direkt auf dem Siliziumsubstrat 1 vorgesehen sein. Die Detektoren 26, 27 und 28 sind für einen Wellenlängenbereich von 0,7 bis 1,8 Mikrometer aus Germanium und für einen Wellenlängenbereich von 0,45 bis 1,1 Mikrometer aus Silizium hergestellt.

Statt einer Anordnung der optischen Detektoren 26, 27 und 28 unmittelbar hinter den Lichtkanälen 19 können alternativ auch optische Fasern zur Lichtübertragung von der Mikroküvette 5 zu der Detektoranordnung 29 vorgesehen sein.

Die Mikroküvette 5 enthält den durch das Spektrometer zu untersuchenden gasförmigen oder flüssigen Stoff, der über eine Eingangsleitung 30 zugeführt und über eine Ausgangsleitung 31 mit Hilfe einer Siliziumpumpe 32 abgeführt wird. Die wellenlängenselektive Absorption des in der Mikroküvette 5 enthaltenen Stoffes wird durch Auswerten der Amplituden der Signale der Detektoranordnung 29 unter Berücksichtigung der jeweils zugeführten Wellenlänge des eingespeisten Lichtes erhalten.

Die Beleuchtungseinrichtung des Spektrometers besteht aus mehreren lichtemittierenden Dioden 33, 34, 35, 36 und 37, die nachfolgend kurz als LED bezeichnet werden. Jede der LEDs erzeugt über einen Spektralbereich von etwa 100 bis 200 Nanometer ein unpolarisiertes Speislicht, das direkt in die Speiseenden der monomodigen optischen Eingangsfasern 11 – 15 eingekoppelt wird. Die Anordnung kann dabei z. B. so getroffen sein, daß das LED 33 Speislicht im Bereich von 2 Mikrometern, das LED 34 im Bereich von 1,4 Mikrometern, das LED 35 im Bereich von 1,1 Mikrometern, das LED 36 im

Bereich von 1 Mikrometer und das LED 37 im Bereich von 0,8 Mikrometern aussendet. Da eine LED in einem optischen Bereich von über 100 Nanometern emittiert, kann mit z. B. fünf LEDs ein durchgehender Spektralbereich von über 500 Nanometern abgedeckt werden.

Die in den V-Gruben 6–10 befestigten Eingangsfasern 11–15 haben beispielsweise einen Durchmesser von 120 Mikrometern und einen Kerndurchmesser von 2–3 Mikrometern. Da alle Komponenten des beschriebenen Spektrometers fest angeordnet sind, erübrigt sich eine optische Nachjustierung beim Betrieb des Spektrometers. Zweckmäßigerweise sind die Eingangsfasern 11–15 in den V-Gruben 6–10 eingelegt und anschließend eingegossen. Die optischen Eingangsfasern 11–15 erstrecken sich bis zu der in Fig. 1 linken Seite der ersten Ausnehmung 2.

Das aus den Eingangsfasern 11–15 austretende Speislicht speist einen mehrfachen auf dem XY-LiNbO₃-Substrat 3 aufgebauten integriert-optischen akustischsteuerbaren Filter 38, der es gestattet, über jeden seiner insgesamt fünf Kanäle jeweils nur Licht vorgegebener elektronisch auswählbarer Wellenlängen durchzulassen. Bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel ist ein mehrfaches integriert-optisches akustischsteuerbares Filter 38, das nachfolgend kurz als mehrfaches IOASF 38 bezeichnet wird, vorgesehen, das über 5 optische Eingänge 39, 40, 41, 42 und 43 sowie über drei optische Ausgänge 44, 45 und 46 verfügt. Das mehrfache IOASF 38 besteht aus 3 integriert-optischen akustischsteuerbaren Filtern 47, 48, 49, die nachfolgend kurz als IOASF bezeichnet sind.

Das IOASF 47 gestattet es, von dem verhältnismäßig breitbandigen über dem optischen Eingang 39 eingespeisten Licht der LED 33 nur Licht innerhalb eines wählbaren engen Spektralbereichs von beispielsweise 2,8 Nanometer durchzulassen.

Der Aufbau und die Funktion eines einzelnen IOASF ist in dem Aufsatz "Integrated Optical, Acoustically Tunable Wavelength Filter", Electronics Letters, 9th November 1989, Vol. 25, No. 23, Seiten 1583-1584 beschrieben. Die einzelnen IOASF 47, 48 und 49 des mehrfachen IOASF 38 sind auf dem XY-LiNbO₃-Substrat 3 (X-Schnitt, Y-Ausbreitung der Wellen) aufgebaut. Statt eines X-Schnittes ist es auch möglich ein Substrat mit einem Y-Schnitt zu verwenden.

Die Filterwirkung der IOASF 47, 48 und 49 beruht auf einer Wechselwirkung zwischen optischen und akustischen Wellen, wobei eingespeiste TE-Moden in TM-Moden oder TM-Moden in TE-Moden konvertiert werden. Die Wellenlänge der jeweils in die komplementäre Mode konvertierten Lichtwellen ist abhängig von der Wellenlänge der jeweils wechselwirkenden akustischen Oberflächenwellen, so daß durch Verändern der Frequenz der akustischen Oberflächenwellen jeweils diejenige Lichtwellenlänge bestimmt werden kann, bei der eine TE-TM-Modenkonzersion erfolgt. Die nicht oder nicht vollständig konvertierten Wellenlängen werden mit Hilfe von im Lichtweg vorgesehenen Polarisatoren unterdrückt.

Das erste IOASF 47 des mehrfachen IOASF 38 verfügt über einen sich zwischen dem optischen Eingang 39 und dem optischen Ausgang 44 erstreckenden monomodigen optischen Streifenleiter 50, der durch Ti-Eindiffusion erzeugt ist. Das den Streifenleiter 50 durchquerende Licht durchquert zunächst einen in der Nähe des optischen Eingangs 39 vorgesehenen integriert-optischen Polarisator 51, mit dessen Hilfe die TE-Mode des Eingangslichts herausgefiltert und die TM-Mode absor-

biert wird. Infolge der kollinearen akusto-optischen TE-TM-Modenkonzersion wird die vom Polarisator 51 durchgelassene TE-Mode entlang dem Streifenleiter 50 in eine TM-Mode konvertiert. Die TM-Mode wird dann von einem zweiten integriert-optischen Polarisator 52 durchgelassen.

Auf der Strecke zwischen dem zweiten integriert-optischen Polarisator 52 bis zum optischen Ausgang 44 erfolgt eine zweite Konversion des Speislichtes im Streifenleiter 50, so daß für die erwünschte Wellenlänge am optischen Ausgang 44 eine TE-Mode vorliegt.

Der optische Ausgang 44 befindet sich im Brennpunkt der Mikrolinse 20, die das doppelt konvertierte Speislicht kollimiert. Anschließend gelangt das Speislicht über den Polarisator 23, der das in eine TE-Mode konvertierte Speislicht durchläßt, zur Mikroküvette 5.

Die zur Modenkonzersion im IOASF 47 verwendeten akustischen Oberflächenwellen werden mit Hilfe eines interdigitalen Wandlers 53 erzeugt, dessen fingerartig ineinandergreifende Elektroden zur Erzeugung akustischer Oberflächenwellen mit einem in seiner Frequenz durchstimmbaren Hochfrequenzsignal über in der Zeichnung nicht dargestellte Leitungen beaufschlagt werden. Die zugeführte Hochfrequenz mit einer Spannung von etwa 1 Volt hat eine Frequenz im Bereich von 150–400 Megahertz und läßt sich jeweils über einige Megahertz zur Abstimmung des durchstimmbaren Wellenlängenfilters oder IOASF 47 verändern. In Abhängigkeit von der Speisfrequenz des interdigitalen Wandlers 53 hat das über den Polarisator 23 in die Mikroküvette 5 gelangende Speislicht eine vorgegebene Lichtwellenlänge innerhalb des von der LED 33 ausgesandten Wellenlängenbereichs. Erfolgt eine Speisung des Wandlers gleichzeitig mit mehreren Frequenzen, erhält man entsprechend mehrere durchgelassene Lichtwellenlängen oder enge Lichtwellenbereiche.

In ähnlicher Weise gestatten es die IOASF 48 und 49 mit den interdigitalen Wandlern 54 und 55 in Abhängigkeit von den den interdigitalen Wandlern 54 und 55 zugeführten Frequenzen des Hochfrequenzsignals jeweils bestimmte Wellenlängen oder enge Wellenlängenbereiche im Licht der LEDs 34–37 auszuwählen, die über die Polarisatoren 24 und 25 zur Mikroküvette 5 gelangen. Ein Durchstimmen der Frequenzen für die IOASF 47, 48 und 49 gestattet somit ein überstreichen eines vorgegebenen durchgehenden oder Unterbrechungen aufweisenden Spektralbereichs, wobei mit Hilfe der Detektoranordnung 49 und einer in der Zeichnung nicht dargestellten Auswertelektronik eine spektroskopische Untersuchung des in der Mikroküvette 5 vorhandenen Stoffes ermöglicht ist.

Die vom interdigitalen Wandler 53 erzeugten Oberflächenwellen werden in einem monomodigen akustischen Wellenleiter geführt, der mit Hilfe von Mantelbereichen 56, 57 erzeugt ist. Der Kern des akustischen Wellenleiters wird von dem Material im Zwischenraum zwischen den Mantelbereichen 56 und 57 gebildet. Zur Erzeugung des akustischen Wellenleiters kann eine Ti-Eindiffusion im Mantelbereich 56 und 57 vorgenommen werden. Alternativ ist es möglich im Kernbereich zwischen den Mantelbereichen 56 und 57 einen Protonenaustausch vorzunehmen. Auf diese Weise ergeben sich höhere Geschwindigkeiten in den Mantelbereichen 56 und 57 und kleinere Geschwindigkeiten für die akustischen Oberflächenwellen im Kernbereich zwischen den Mantelbereichen 56 und 57, durch den sich der optische Streifenleiter 50 erstreckt. Wie man in Fig. 1 weiter erkennt, sind akustische Absorber 58, 59 vorgesehen, um

Reflexionen der akustischen Oberflächenwellen an den Rändern des Substrates 3 zu vermeiden.

Zusätzlich zum ersten IOASF 47 verfügt der mehrfache IOASF 38 über das zweite IOASF 48, das für einen anderen Wellenlängenbereich ausgelegt ist. Während das IOASF 47 nur über einen geradlinig durchgehenden Streifenleiter 50 verfügt, ist der Streifenleiter 60 des zweiten IOASF 48 mit einer Y-Verzweigung 61 versehen, so daß zwei Eingangswellenleiter 62, 63 zur Zuführung von Speislicht der LEDs 34 und 35 verwendet werden können. Das zweite IOASF 48 verfügt eingangsseitig über integriert-optische Polarisatoren 64 und 65 und einen weiteren Polarisator 66, der wie der Polarisator 52 zum Absorbieren einer TE-Mode und zum Durchlassen der durch kollinear laufende akustische Oberflächenwellen umgewandelten TM-Mode dient. Das am Polarisator 24 austretende Licht enthält jeweils einen engen Lichtwellenlängenbereich des Spektrums der LED 34 und einen anderen kleinen Lichtwellenlängenbereich aus dem Spektrum der LED 35.

Entsprechend enthält bei einer Ansteuerung des Wandler 55 mit zwei Frequenzen das durch den Polarisator 25 in die Mikroküvette 5 gelangende Speislicht zwei Lichtwellenlängen oder enge Lichtwellenlängenbereiche aus den Spektralbereichen der LEDs 36 und 37, wobei die Selektion jeweils über die Frequenz der an den interdigitalen Wandler 55 angelegten Durchstimmspannung erfolgt.

Beim dritten IOASF 49, dessen Mantelbereich 67 auch als Mantel für den akustischen Wellenleiter des IOASF 48 dient, sind zwei optische Streifenleiter 68 und 69 vorgesehen, die sich durch den Kern des akustischen Wellenleiters erstrecken, der von dem Mantelbereich 67 und einem zweiten Mantelbereich 70 gebildet ist. Die Steuerung der beiden optischen Wellenleiter erfolgt mit dem interdigitalen Wandler 55 in einer der vorangehenden Beschreibung entsprechenden Weise. Ähnlich wie das IOASF 48 verfügt das IOASF 49 über Polarisatoren 64, 65 und 66. Das Licht am optischen Ausgang 46 im Brennpunkt der Mikrolinse 22 speist die Mikroküvette 5 nach Durchqueren des Polarisators 25.

Das anhand der Fig. 1 beschriebene optische Spektrometer läßt sich äußerst kompakt und platzsparend aufbauen und elektronisch sehr schnell durchstimmen. Der Einsatz des mehrfachen IOASF 38 gestattet es, mehrere optische Kanäle zu verwenden und ein Auflösungsvermögen in der Größenordnung von 1 Nanometer bei einem optischen spektralen Arbeitsbereich von mehr als 500 Nanometer zu erreichen. Schnelle Wellenlängenänderungen sind innerhalb von Millisekunden möglich. Von Vorteil ist weiterhin die parallele Verarbeitung in den parallel geschalteten optischen Kanälen. Der Fachmann erkennt, das es möglich ist, die LEDs 33–37 zu modulieren, was unter anderem die Erzeugung von kurzen Impulsen für kinetische Untersuchungen ermöglicht. Lichtmodulation zu Zwecken der Detektion in Lock-in-Verstärkern ist einfach durchzuführen, ohne daß zusätzliche Chopper oder elektrooptische Modulatoren verwendet werden müssen. Da die kollineare Wechselwirkung keine harmonischen Bänder auftreten läßt, ist es nicht notwendig Kantenfilter zu verwenden.

Der Abstand zwischen den Mantelbereichen 56, 57, 67 und 70 ist so gewählt, daß die durch sie gebildeten akustischen Wellenleiter monomodig sind. Die zur Erzeugung der akustischen Wellen vorgesehenen interdigitalen Wandler 53, 54 und 55 können je nach Notwendigkeit so ausgelegt sein, daß sie zum Beispiel eine mög-

lichst große akustische Bandbreite haben oder schmalbandig sind, aber eine stärkere akustische Welle anregen. Zu diesen Zwecken können Wandler mit viel oder weniger Fingerpaare ge-chirpte, fokussierende, apodisierte, unidirektionale etc. Wandler angewendet werden. Die Breite der Wandler soll zu der Breite des entsprechenden akustischen Wellenleiters angepaßt werden (gilt nicht für fokussierende Wandler). Es kann von Vorteil sein, die akustischen Wellenleiter eingangsseitig mit hornförmigen Aufweitungen zu versehen. Das erlaubt, breitere Wandler anzuwenden, die besser an den Ausgangswiderstand eines Generators anzupassen sind, was letztlich zu einer Reduzierung der für die Konversion notwendigen elektrischen Energie führt.

Fig. 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel für ein elektronisch steuerbares Spektrometer, bei dem für diejenigen Bauteile, die mit denen des Ausführungsbeispiels gemäß Fig. 1 übereinstimmen, die gleichen Bezugszeichen verwendet worden sind. Im Gegensatz zum Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1, ist beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2 keine Mikroküvette in unmittelbarer Nähe des mikrooptischen Chips vorgesehen. Der mit Hilfe des in Fig. 2 dargestellten Spektrometers untersuchende Stoff befindet sich vielmehr in einem größeren Abstand von dem in Fig. 2 dargestellten mikrooptischen Aufbau. Auch die Detektoren zur Auswertung der Lichtintensität bei den jeweils verwendeten Lichtwellenlängen befinden sich in einem mehr oder weniger großen Abstand von dem in Fig. 2 dargestellten Teil des Spektrometers.

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Ausführungsbeispiel wird das Licht der LEDs 33, 34, 35, 36 und 37 wie bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel zu den optischen Ausgängen 44, 45 und 46 geführt. Diese befinden sich im Brennpunkt der Mikrolinsen 20, 21 und 22, die das von den optischen Ausgängen 44, 45 und 46 kommende Licht kollimieren und über Polarisatoren 23, 24 und 25 weiterleiten. Nach dem Durchtritt durch die Polarisatoren 23, 24 und 25 wird das von den Polarisatoren 23, 24 und 25 nicht ausgefilterte Licht mit Hilfe zweier Mikrolinsen 80, 81 und 82 fokussiert, die sich jeweils in gegenüber den Hohlräumen 16, 17, 18 gemäß Fig. 1 vergrößerten Hohlräumen 16, 17, 18 befinden.

Das mit den Mikrolinsen 80, 81, 82 fokussierte Licht wird in multimodige optische Fasern 83, 84, 85 eingespeist. Das von den optischen Fasern 83, 84, 85 geführte monochromatische Licht kann an entfernte Orte oder schwer zugängliche Stellen geleitet und dort zu spektroskopischen Zwecken eingesetzt werden. Wie eingangsseitig können auch die optische Fasern 83, 84 und 85 als Ausgangsfasern mit Hilfe von einem Si-V-GrubenArray direkt an das mehrfache IOASF 38 angekoppelt werden. In einem derartigen Fall entfallen die Mikrolinsen 20, 21, 22, 80, 81 und 82. Die Polarisatoren 23, 24 und 25 werden in derartigem Fall auf dem LiNbO₃-Substrat integriert hergestellt.

Das von den optischen Fasern 83, 84 und 85 geführte Licht kann über einen Koppler auch in einen einzigen in der Zeichnung nicht dargestellten Lichtwellenleiter eingespeist und dann auf einfache Weise über große Entfernungen, beispielsweise 100 Meter, zum Ort des zu messenden Stoffes geführt werden. Dabei kann das Licht jeder der fünf Kanäle mit einer eigenen Frequenz von beispielsweise 10 Hertz bis 30 Kilohertz moduliert werden.

Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel für ein besonders kurzes Spektrometer mit einer einseitigen Kopplung. In Fig. 3 erkennt man auf der linken Seite ein Si-V-Gruben-

ben-Array 86, das dazu dient, sowohl die optischen Eingangsfasern 11, 12 als auch die optischen Ausgangsfasern 83, 84 an das mehrfache IOASF 88 zu koppeln. Bei den Eingangsfasern 11, 12 handelt es sich um monomodige Fasern, jedoch bei den Ausgangsfasern 83, 84 um Multimode-Lichtwellenleiter.

Das von der Eingangsfasern 11 zum mehrfachen IOASF 88 eingespeiste Licht gelangt über den optischen Eingang 39 zum ersten Zweig 89 eines optischen Streifenleiters 90 mit einem Y-Verzweiger 91. Der optische Streifenleiter 90 ist wie bei den eingangs beschriebenen Ausführungsbeispielen ein Ti-eindiffundierter Wellenleiter. Ober den optischen Eingang 39 gelangt das eingespeiste Licht zunächst zum ersten Zweig 89, das ein protonenausgetauschtes Wellenleiterstück ist und als Polarisator dient. Das protonenausgetauschte Wellenleiterstück läßt nur die TE-Polarisation (XY-Schnitt LiNbO_3) durch.

Im optischen Streifenleiter 90 wird die TE-Mode in eine TM-Mode in der bereits oben beschriebenen Weise durch eine Wechselwirkung mit akustischen Oberflächenwellen umgewandelt.

Wie man in Fig. 3 rechts erkennt, erstreckt sich der Streifenleiter 90 bis zu einem Spiegel 92, der auf der in Fig. 3 rechten Substratseite des mehrfachen IOASF 88 aufgebracht ist. Unmittelbar vor dem Spiegel befindet sich ein Polarisator 93, der durch zwei protonenausgetauschte Bereiche 94 und 95 gebildet ist, die sich auf beiden Seiten und in unmittelbarer Nähe des optischen Streifenleiters 90 befinden.

Auf dem mehrfachen IOASF 88 befinden sich weiterhin Mantelbereiche 56, 57 und 67 zur Bildung zweier akustischer Wellenleiter für die von dem interdigitalen Wandler 53 und dem interdigitalen Wandler 54 erzeugten Oberflächenwellen zur Durchstimmung der Filter.

Zwischen dem optischen Ausgang 44 und dem Y-Verzweiger 91 ist ein protonenausgetauschter Arm als zweiter Zweig 96 vorgesehen. Der zweite Zweig 96 bildet ebenfalls einen Polarisator. Das aus dem optischen Ausgang 44 austretende Licht wird in die Ausgangsfaser 83 eingespeist und über diese zu dem zu untersuchenden Stoff geschickt.

Von dem durch das LED 33 erzeugten Licht gelangt nur die TE-Mode durch den Polarisator des ersten Zweiges 89 und den Y-Verzweiger 91 in den Streifenleiter 90. Mit der vom Wandler 53 angeregten akustischen Welle wird die TE-Mode des Speiselichts in eine TM-Mode umgewandelt während sich das Licht in Richtung auf den Spiegel 92 ausbreitet. Mit Hilfe des Polarisators 93 wird die restliche TE-Polarisation absorbiert. Nach der Reflexion am Spiegel 92 läuft die TM-Mode durch den Streifenleiter 90 zurück und wird von derselben akustischen Welle wie bei der Umwandlung auf dem Hinweg zum Spiegel in eine TE-Mode zurück- oder umgewandelt. Im zweiten Zweig 96 wird die restliche TM-Mode von dem protonenausgetauschten Wellenleiterstück eliminiert, so daß am optischen Ausgang 44 wieder eine reine TE-Mode vorliegt.

Da das Speiselicht im optischen Streifenleiter 90 innerhalb des akustischen Wellenleiters einen Hinweg und einen Rückweg zurücklegt, ergibt sich eine doppelte Konversion, was zu einem monochromatischen Ausgangssignal in der optischen Faser 83 mit einer sehr schmalen Bandbreite und einer sehr guten Unterdrückung des Untergrundes führt. Für jede Konversion steht die gesamte Kristalllänge zur Verfügung. Dadurch ergibt sich eine besonders schmale optische Bandbreite und gegenüber einer einzigen Konversion innerhalb des

akustischen Wellenleiters eine um den Faktor zwei kleinere akustische Energie, die für die Konversion erforderlich ist.

Wie bei den weiter oben beschriebenen Ausführungsbeispielen verfügt das mehrfache IOASF 88 ebenfalls über akustische Absorber 58 und 59, die sich quer zur Ausbreitungsrichtung der Oberflächenwellen auf der Oberseite des mehrfachen IOASF 88 in der in Fig. 3 erkennbaren Weise erstrecken.

Das mehrfache IOASF 88 enthält neben dem oben beschriebenen ersten IOASF mit einem einzigen den akustischen Wellenleiter durchquerenden Streifenleiter 90 ein zweites IOASF mit getrennten Streifenleitern 98, 99 für den Hinweg zu einem Spiegel 100 und den Rückweg vom Spiegel 100.

Das in Fig. 3 unten dargestellte zweite IOASF hat eine ähnliche Wirkungsweise und ähnliche Vorteile wie das oben in Fig. 3 dargestellte erste IOASF. Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich durch die räumliche Trennung des Eingangs- und Ausgangskanals, die besser voneinander isoliert sind. Innerhalb des akustischen Wellenleiters, der vom interdigitalen Wandler 54 angeregt wird, befinden sich somit zwei optische Kanäle.

Das Licht der LED 34 gelangt über die monomodige Eingangsfasern 12 und den optischen Eingang 42 zum protonenausgetauschten oberen Arm 101, der als Polarisator wirkt und nur eine TE-Mode durchläßt. Beim Durchqueren des Streifenleiters 98 erfolgt eine TE-TM-Umwandlung. In unmittelbarer Nähe des Spiegels 100 befindet sich ein Polarisator 102 aus mehreren die Streifenleiter 98, 99 einschließenden protonenausgetauschten Bereichen, der nur die TM-Mode durchläßt und nicht umgewandeltes Licht somit absorbiert. Auf dem Rückweg vom Spiegel 100 durch den Streifenleiter 99 wird die TM-Mode durch die Wechselwirkung mit der akustischen Oberflächenwelle im akustischen Wellenleiter in eine TE-Mode umgewandelt und gelangt schließlich in den unteren Arm 103, in dem die restliche TM-Polarisation absorbiert wird, da dieser als integrierter Polarisator ausgebildet ist. Somit liegt am optischen Ausgang 46 eine reine TE-Mode vor. Das Ausgangslicht wird schließlich über die multimodige optische Faser 84 zum zu untersuchenden Stoff geführt.

Fig. 4 veranschaulicht ein elektronisch steuerbares Miniaturspektrometer für den sichtbaren und nahen Infrarotbereich, das sowohl in Transmission als auch in Reflexion verwendet werden kann. Aus Vereinfachungsgründen ist in Fig. 4 derjenige Teil des Spektrometers nicht mehr dargestellt, der demjenigen Teil entspricht, welcher sich in Fig. 1 links der Mikrolinsen 20, 21 und 22 befindet.

In Abwandlung zu dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel ist die zweite Ausnehmung 4 vergrößert und auf der in Fig. 4 linken Seite mit Detektoren 104, 105, 106 belegt, die es gestatten, von der Mikroküvette 5 oder einem anderen in der zweiten Ausnehmung 4 eingebrachten Gegenstand zurückgestreutes Licht bezüglich seiner Intensität zu messen. Um ein Übersprechen zwischen den einzelnen Kanälen zu vermeiden sind die Detektoren 104, 105, 106 durch Trennstage 107 und 108 optisch voneinander getrennt oder so in Vertiefungen untergebracht, daß die Detektoren 104, 105, 106 jeweils nur das für sie bestimmte Licht erhalten können.

Bei einer Messung in Reflexion wird somit das von der Mikroküvette 5 oder einem sonstigen lichtstreuenden oder lichtabsorbierenden Objekt zu den Detektoren 104, 105 und 106 gelangende Licht ausgewertet.

Bei einer Messung in Transmission erfolgt eine Aus-

wertung des mit Hilfe der Detektoranordnung 29 und den Detektoren 26, 27 und 28 erfaßten Lichtes.

Neben den Detektoren zur Messung in Transmission und Reflexion verfügt der in Fig. 4 dargestellte mikrooptische Chip zusätzlich über einen Referenzdetektor 109, der es gestattet, eine Referenzbildung zur elektronischen Kompensation von Intensitätsschwankungen des Speiselichtes durchzuführen. Dazu ist im Lichtweg hinter der Mikrolinse 22 im Hohlraum 18 ein schräg verlaufendes Glasplättchen 110 vorgesehen, das einen Teil des einfallenden Speiselichtes rechtwinklig durch einen Lichtkanal 111 zum Referenzdetektor 109 an der in Fig. 4 unteren Seite des mikrooptischen Chips umlenkt.

Der in Fig. 4 dargestellte mikrooptische Chip aus geätzttem Silizium gestattet es somit, auch lichtundurchlässige Substanzen, insbesondere feste Stoffe oder stark absorbierende Flüssigkeiten in Reflexion zu untersuchen. Daher ist die beschriebene Konstruktion universell für alle in der Nahinfrarot-Spektroskopie auftretenden Fälle. Flüssigkeiten, feste Stoffe, puderförmige Substanzen, Öle und Fette können untersucht werden. Wenn anstelle der Mikroküvette 5 andere lichtstreuende oder lichtabsorbierende Objekte in die zweite Ausnehmung 4 eingebracht werden, können dünne Schichten auf einem flachen Träger, dünne Platten aus einem beliebigen Material oder dergleichen untersucht werden. Nach diesem Prinzip können auch Sensoren aufgebaut werden. Es können dann solche Objekte ausgewählt werden, die ihre optischen Eigenschaften (z. B. Farbe) unter der Wirkung eines externen Parameters (z. B. Gas) ändern. Die dabei geänderte Transmission oder Reflexion ist ein Maß für die Stärke der Wirkung des externen Parameters (in diesem Fall für die Gaskonzentration).

Fig. 5 zeigt eine weitere Abwandlung des in Fig. 1 dargestellten Spektrometers, das ebenfalls wie das anhand der Fig. 4 erläuterte Spektrometer die Bildung eines Referenzsignales zur Korrektur des Hauptsignales zuläßt, um dadurch insbesondere Intensitätsfluktuationen in dem gesamten Spektrometersystem elektronisch kompensieren zu können.

In Abwandlung zu dem in Fig. 1 rechts dargestellten Aufbau zeigt Fig. 5 eine Anordnung der Mikroküvette 5, die nicht rechtwinklig, sondern schräg zum Strahlengang des Speiselichtes ausgerichtet ist. Bei einem Winkel von 45° ist es möglich Referenzdetektoren 109 an der in Fig. 5 unten gezeigten Seite des mikrooptischen Chips zusätzlich zu den Detektoren 26, 27 und 28 an der rechten Seite des mikrooptischen Chips zur Auswertung des Hauptsignals vorzusehen. Bei der in Fig. 5 dargestellten Anordnung wird die an der Vorderseite der Mikroküvette 5 auftretende Teilreflexion (etwa 4–5% bei einer Glasküvette) ausgenutzt, um mit Hilfe der Detektoren 109 Referenzsignale zu bilden. Bauteile, die mit den Bauteilen der weiter oben beschriebenen Ausführungsformen übereinstimmen, sind mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Patentansprüche

1. Optisches Spektrometer mit einer an wenigstens einen Lichtwellenleiter angekoppelten Beleuchtungseinrichtung zur Anstrahlung eines in einem Meßprobenraum enthaltenen spektroskopisch zu untersuchenden Stoffes, mit einer Monochromatoreinrichtung und mit einer Detektoranordnung, dadurch gekennzeichnet, daß die Monochromatoreinrichtung durch wenigstens ein integriert-op-

tisches akustisch-steuerbares Wellenlängenfilter (38, 47–49, 88) gebildet ist, dessen Ausgangslicht nach einer Wechselwirkung mit dem zu untersuchenden Stoff (5) die Detektoranordnung < 26, 27, 28, 29) beaufschlagt.

2. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungseinrichtung aus mehreren unterschiedliche Spektralbereiche abdeckenden lichtemittierenden Dioden (33, 34, 35, 36, 37) gebildet ist, die jeweils über eine monomode optische Faser (11, 12, 13, 14, 15) das jeweils zugeordnete Wellenlängenfilter (47, 48, 49) mit breitbandigem Licht beaufschlagen.

3. Spektrometer nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Wellenlängenfilter (38, 47–49, 88) einen akustischen Wellenleiter (56, 57, 67, 70) mit einem interdigitalen Wandler (53, 54, 55) zur Erzeugung von Oberflächenwellen, wenigstens ein Polarisationsfilter (23, 24, 25, 51, 52, 64, 65, 66, 93, 102), zwei akustische Absorber (58, 59) und einen vom akustischen Wellenleiter umgebenen optischen Streifenleiter (50, 60, 68, 69, 90, 98, 99) aufweist.

4. Spektrometer nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Wellenlängenfilter (38, 88) ein XY-LiNbO₃-Substrat aufweist.

5. Spektrometer nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Streifenleiter (60) eingangsseitig eine Verzweigung (61) zum Einkoppeln des Lichtes zweier lichtemittierender Dioden (34, 35) aufweist.

6. Spektrometer nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens zwei optische Streifenleiter (68, 69) vorgesehen sind, die jeweils mit dem Licht zugeordneter Dioden (36, 37) beaufschlagbar sind.

7. Spektrometer nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Streifenleiter (90, 98, 99) an dem dem Einspeisende gegenüberliegenden Ende einen Polarisator (93, 102) und einen Spiegel (92, 100) aufweist.

8. Spektrometer nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Streifenleiter (90) an dem dem Spiegel (92) gegenüberliegenden Ende eine Y-Verzweigung (91) aufweist.

9. Spektrometer nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Wellenlängenfilter innerhalb des akustischen Wellenleiters einen ersten optischen Streifenleiter (98), über den das Speiselicht zum Spiegel (100) gelangt, und einen zweiten optischen Streifenleiter (99) aufweist, über den das vom Spiegel (100) reflektierte Licht auskoppelbar ist.

10. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektoranordnung (29) in unmittelbarer Nähe des Meßprobenraumes (4, 5) angeordnet ist, der über eine Linsenanordnung (20, 21, 22) an die Wellenlängenfilter (47, 48, 49) optisch gekoppelt ist.

11. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Ausgangslicht der Wellenlängenfilter (47, 48, 49) über multimodige Fasern (83, 84, 85) zu dem zu untersuchenden Stoff geführt ist.

12. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Meßprobenraum (4) eine Mikroküvette (5) für den zu untersuchenden Stoff angeordnet ist.

13. Spektrometer nach Anspruch 12, dadurch ge-

kennzeichnet, daß die Mikroküvette (5) schräg zur Einfallsrichtung des Lichtes angeordnet ist und das an der Mikroküvette (5) reflektierte Licht eine Referenzsignal-Detektoranordnung (109) speist, die eine Kompensation von Intensitätsschwankungen 5 ermöglicht.

14. Spektrometer nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikroküvette (5) rechtwinklig zur Einfallsrichtung des Lichtes und im Abstand von Detektoren (104, 105, 106) der Detektoranordnung 10 vorgesehen ist, die das von der Mikroküvette (5) und vom Inhalt der Mikroküvette (5) zurückgestreute Licht zur spektralen Auswertung erfassen.

15. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Strahlengang zwischen dem Wellenlängenfilter (38, 88) und der Detektoranordnung (29) ein schräg angeordnetes Glasplättchen (110) zur Auskopplung eines Referenzsignales vorgesehen ist. 15

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

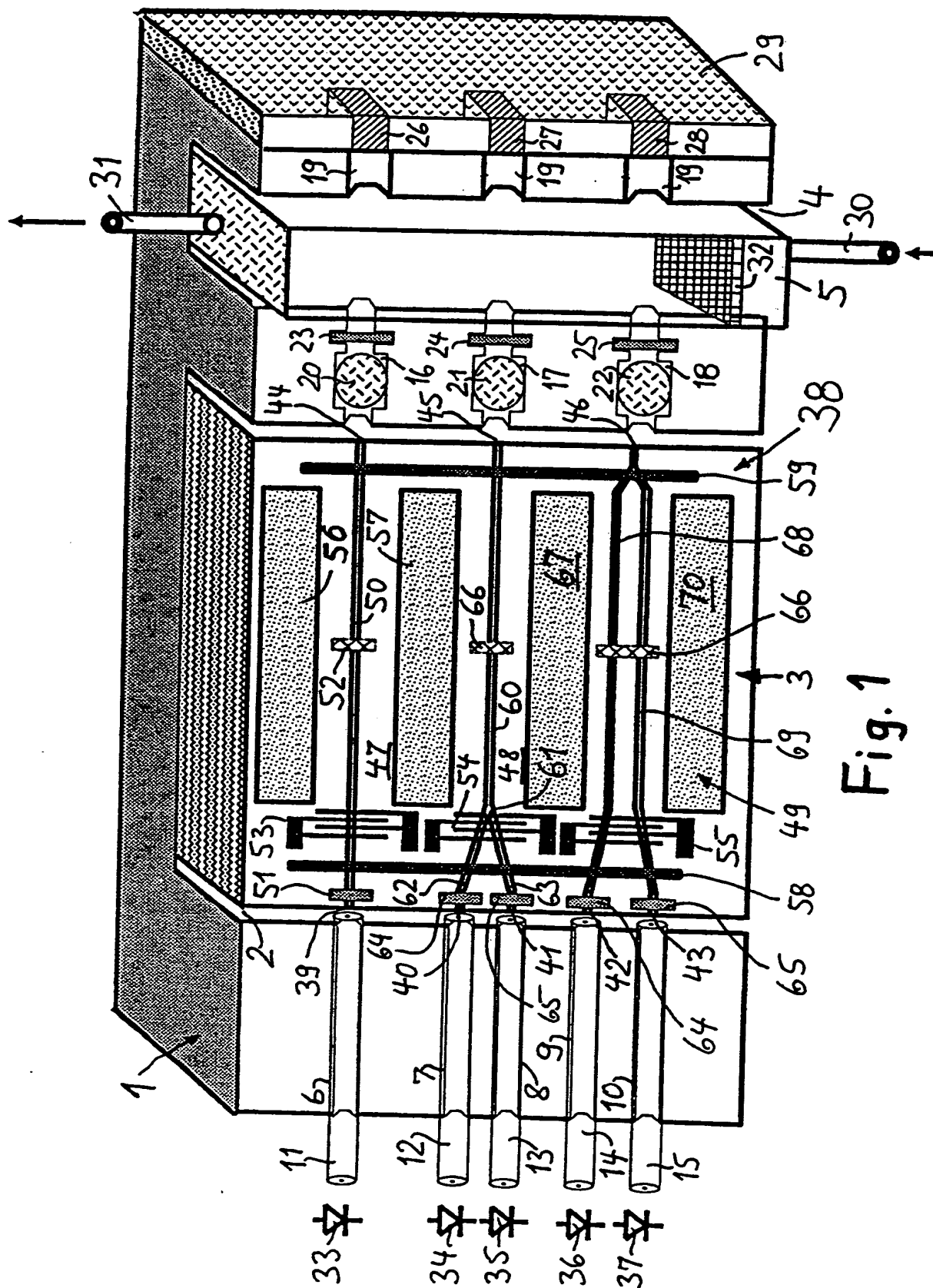


Fig. 1

